Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 65 (1974)

Heft: 17

Artikel: Comparaison économique des différents systèmes de refroidissement en fonction des contraintes d'environnement

Autor: Remeysen, J. / Dievort, J. van / Oplatka, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915452

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

observations faites au voisinage des pulvérisateurs peuvent être intéressantes. La fréquence de production de brouillard était maximale au petit matin. Dans l'immense majorité des cas, le brouillard observé demeurait à une certaine hauteur. Des passages de brouillard au sol ou à proximité du sol sur une distance de 46 m ou plus ont été observés pour de brèves périodes pendant 60 jours sur un total de 456 de janvier 1972 à fin mars 1973. Pendant les mois d'hiver, de très faibles traces de neige ont été observées deux fois au-dessous du brouillard émis.

Il ressort d'essais d'après la *Ceramic Cooling Tower Company* effectués en divers lieux dans des conditions atmosphériques très variées que la bruine mesurable ne s'est jamais étendue, pendant une période significative quelconque, à une distance supérieure à 183 m des pulvérisateurs.

Adresse de l'auteur:

F. H. Rainwater, chef de la Section de la pollution thermique, Agence fédérale pour la protection de l'environnement, Laboratoire de recherche sur l'environnement du Pacifique nord-ouest, 200 SW 35th Street, Corvallis, Oregon 97330 (USA).

Comparaison économique des différents systèmes de refroidissement en fonction des contraintes d'environnement

Extrait du rapport préparé par J. Remeysen, J. Van Dievort et G. Oplatka

Dieser Bericht zeigt, in welchem Umfange die verschiedenen Umweltbedingungen das Konzept der Kühlsysteme für thermische Kraftwerke beeinflussen. Anschliessend werden die Auswirkungen dieser Faktoren auf den Gestehungspreis der erzeugten Energie diskutiert.

Le but du rapport est d'examiner dans quelle mesure les différentes contraintes d'environnement influencent la conception des systèmes de réfrigération de centrales électriques pour pouvoir évaluer ensuite la répercussion de ces contraintes sur le prix de revient de l'énergie produite.

1. Contraintes thermiques

1.1 Définition des contraintes thermiques

Les réglementations qui tendent à protéger les cours d'eau contre le déversement indésiré de chaleur diffèrent d'un pays à l'autre et évoluent depuis quelque temps vers des limitations de plus en plus sévères.

En général, un ou plusieurs des critères suivants sont utilisés:

1.1.1 Limitation de la température maximale de l'eau réceptrice après mélange avec le rejet.

Ce critère est adopté dans tous les règlements; le maximum étant habituellement 30 °C avec certains pays qui s'orientent vers 28 °C, voire 25 °C.

1.1.2 Limitation de l'échauffement de la rivière par le fait d'un rejet

Ce critère est souvent combiné avec le précédent; les valeurs admises varient entre 3 et 9 °C. Il ne peut s'appliquer que lorsque les différents rejets, le long d'une rivière, sont suffisamment distants pour qu'ils ne se superposent pas.

1.1.3 Limitation de l'échauffement de la rivière par rapport à sa température naturelle

Ce critère est de plus en plus utilisé et envisagé malgré la difficulté de déterminer la température naturelle de l'eau réceptrice lorsqu'il s'agit d'une rivière déjà chargée thermiquement.

1.1.4 Limitation de la quantité de chaleur déversée

Dans ce cas, la gestion de la capacité frigorifique d'un cours d'eau ou d'un tronçon de cours d'eau, est concentrée dans les mains d'un seul organisme qui agit en fonction de critères qui lui sont propres. La limite peut être variable d'après les saisons ou fixe; pour certaines rivières, plus aucun déversement de chaleur n'est autorisé (Rhin et Aar en Suisse).

1.1.5 Limitation de la température de l'eau rejetée

Ce critère est parfois appliqué et dans ce cas une température de 30 °C est souvent admise; la température est parfois mesurée à une certaine distance du point d'injection.

1.1.6 Limitation de l'échauffement entre entrée et sortie du condenseur

Quelques pays ont songé à appliquer ce critère en fixant une limite à environ 10 °C. Cette valeur est assez souvent choisie par les exploitants, même en l'absence de toute réglementation à ce sujet.

1.2 Systèmes de refroidissement

Les différents systèmes de réfrigération peuvent être classés parmi les catégories suivantes:

1. Le système ouvert, sans réfrigérant, utilisant comme source froide un lac, une rivière, un canal, un estuaire ou la mer.

2. Systèmes avec tour de réfrigération humide, à circulation naturelle ou forcée. Diverses dispositions sont possibles:

a) réfrigérant sur rejet
b) circuit fermé
c) circuit mixte

3. Systèmes avec tour de réfrigération sèche, à circulation naturelle ou forcée. Deux solutions sont à distinguer:

a) Le système direct où la vapeur est condensée dans un aéro-réfrigérant.

b) Le système indirect (Heller) où la vapeur cède sa chaleur à l'eau qui, à son tour, la cède à l'air. Le condenseur peut être à mélange ou à surface.

4. Les systèmes avec tour humide-sèche où l'eau à refroidir passe d'abord dans un échangeur pour être pulvérisée ensuite.

5. Les bassins d'aspersion où l'eau est pulvérisée dans une installation fixe ou par des unités flottantes.

1.3 Influence des contraintes sur le choix du site et des systèmes de réfrigération

Il ne suffit pas de choisir pour un site donné le meilleur système de réfrigération, c'est-à-dire le système qui, tout en respectant les normes, aboutit au moindre prix de l'énergie produite.

Il faut, en effet, voir beaucoup plus loin et choisir, parmi les sites possibles, ceux qui permettent d'utiliser au mieux le potentiel réfrigérateur des diverses sources froides, compte tenu d'autres contraintes comme l'éloignement des centres de consommation. Pour l'illustrer, nous reprenons les résultats d'une étude américaine qui traduit en distances le coût supplémentaire des divers systèmes de refroidissement par rapport au circuit ouvert:

– Circuit ouvert	base
– Bord de mer	25 km
– Bassin de refroidissement	55 km
– Bord de l'Atlantique ou de La Manche	130 km
– Tour humide à tirage naturel	135 km
– Tour humide à tirage forcé	125 km
– Tour sèche	515 km

D'après ces données, qui ne sont évidemment que très approximatives, il ne faudrait pas construire une centrale à tour sèche si, quelque part dans un rayon de 515 km, on trouve un endroit qui se prête à la réfrigération directe.

Il ne laisse pas de doute que le coût du transport de certains combustibles et les possibilités d'évacuer les cendres, peuvent modifier sensiblement ces valeurs.

Les différentes contraintes de température déjà énumérées, prises isolément, agissent dans les sens suivants:

1.3.1 La limite sur l'échauffement dans le condenseur

Cette limite, si elle existe, est à considérer en premier lieu car elle intervient directement dans le calcul du débit qui passe à travers le condenseur. Si l'échauffement permis est de 10 à 12 °C, cette contrainte n'affectera pas le choix d'un système, mais uniquement son dimensionnement.

Pour des valeurs plus faibles, de l'ordre de 7 °C, les suppléments d'investissements et les frais d'exploitation deviennent tels que, pour s'affranchir de cette contrainte, le choix d'un système fermé deviendra préférable. Un circuit mixte n'apporte pas de solution.

Une limite à l'échauffement du condenseur, à elle seule, n'affecte pas la quantité de chaleur qui peut être déversée. Elle peut, cependant, par le biais du mécanisme cité, conduire à abandonner tout déversement et empêcher l'utilisation d'une capacité frigorifique disponible.

1.3.2 La limite sur la température maximale de l'eau après mélange

Il s'agit d'une limite saisonnière sur la quantité de chaleur rejetée. Cette quantité est une fonction du débit du fleuve et de sa température en amont de la centrale. La température est, à son tour, une fonction des conditions atmosphériques et de la charge thermique préexistante.

Plusieurs choix sont possibles si la réfrigération directe est compromise:

a) réduction temporaire de la puissance; cette solution peut se défendre si le risque de dépassement est faible;

b) installation d'un réfrigérant sur le rejet si la probabilité de dépassement est plus grande;

c) fonctionnement en circuit mixte s'il y a danger de recirculation sur la rivière pendant l'étiage ou si la charge préexistante est grande.

Des réfrigérants humides à tirage forcé se justifient généralement plutôt que ceux à tirage naturel.

1.3.3 La limite sur la température maximale du rejet

Cette limite est également saisonnière, mais ne dépend que de la température du fleuve en amont de la centrale. Pour satisfaire à cette exigence, ont peut:

a) maintenir le circuit ouvert, mais concevoir la centrale pour un débit d'eau de circulation plus important;

b) réduire temporairement la puissance;

c) installer un réfrigérant sur le rejet;

d) adopter un circuit fermé.

1.3.4 La limite sur l'échauffement de la rivière, soit par rapport à la température en amont de la centrale, soit par rapport à la température naturelle

Cette limite affecte la quantité de chaleur rejetée en fonction du débit de la rivière. Si la réfrigération directe ne s'avère pas possible dans certaines saisons, on peut recourir à:

a) une réduction de la puissance;

b) l'installation d'un réfrigérant sur le rejet. Cette mesure est applicable si la contrainte n'est pas trop sévère; il y a lieu de tenir compte de la performance variable du réfrigérant en fonction des conditions atmosphériques;

c) l'adoption d'un circuit mixte.

1.3.5 La limite sur la quantité de chaleur rejetée

Le cas se ramène au précédent, mais comme la limite n'est pas saisonnière, la réduction temporaire de la puissance ne constitue pas une solution.

1.3.6 Les limites combinées

La combinaison la plus fréquente est celle d'une limite de la température maximale de l'eau réceptrice après mélange, avec un échauffement d'eau réceptrice limité.

Dans certains cas, une limite de la température de l'eau rejetée et un échauffement limité au condenseur peuvent s'y ajouter.

Dans ces conditions, quand il s'agit d'un fleuve à débit variable et parfois insuffisant, la recherche de l'optimum peut conduire à l'examen d'un très grand nombre de variantes, surtout si une réduction temporaire de la puissance est considérée comme acceptable.

1.4 Incidence des contraintes de température sur l'économie d'une centrale

1.4.1 Comparaison des coût de différents systèmes de réfrigération

Le tableau I reprend les résultats de quelques études, ramenés à une présentation commune.

On remarquera, à l'examen de ce tableau, que non seulement les valeurs données sont très différentes, mais que même les tendances sont opposées quand il s'agit de comparer la circulation forcée à la circulation naturelle.

Ces divergences ne sont pas si étonnantes quand on se rend compte de la complexité du problème: en effet, d'une

part les optimisations sont faites suivant des méthodes et critères différents et d'autre part les bases de calcul elles-mêmes dépendent essentiellement:

a) des caractéristiques du site, nature, qualité et disposition de la source froide, configuration du terrain, nature du sol, niveau de la nappe phréatique, climat, exposition aux vents et aux séismes;

b) de la nature, de la taille et des caractéristiques des équipements principaux de la centrale;

c) des éventuelles extensions futures de la centrale;

d) des conditions économiques;

e) des prévisions de charge;

f) des contraintes.

Des comparaisons ne sont donc valables que quand il s'agit de différentes solutions pour un même site, en utilisant les mêmes données de base et en procédant de la même façon pour déterminer les optima.

1.4.2 Coût des différentes contraintes

a) *Echauffement au condenseur*

Sans contrainte, l'échauffement optimum se situe entre 10 et 20 °C; il dépend très fortement du coût des liaisons entre la source froide et le condenseur.

Quand on s'écarte sensiblement de l'optimum, vers des échauffements plus faibles, le coût monte très rapidement comme le montre la fig. 1.

b) *Température maximale et échauffement de la rivière*

Une étude à ce sujet a été faite par Electricité de France pour une unité de 1200 MW à implanter à Gien sur la Loire. Les résultats de cette étude sont consignés dans la fig. 2. Le diagramme permet d'évaluer pour ce site le coût d'une législation qui viserait séparément ou simultanément la température maximale et l'échauffement de la rivière.

Chaque point du diagramme correspond au meilleur système de refroidissement. L'échauffement au condenseur est fixe et égal à 10 °C.

c) *Quantité de chaleur rejetée*

Une étude a été faite récemment pour une unité nucléaire de 1000 MW à construire en Belgique le long de l'Escaut entre Anvers et la frontière néerlandaise.

La quantité de chaleur qui peut être rejetée est fonction de l'emplacement choisi.

Le coût de cette contrainte est représenté à la fig. 3. L'incidence des frais de préparation de l'eau d'appoint devient très importante pour les rejets faibles. Il s'agit en effet d'une

Augmentation du coût de l'énergie produite dans une centrale munie de réfrigérants, par rapport au coût respectifs désigné comme base. Les valeurs sont exprimées en pourcent; elles sont relatives à des installations de grande puissance conventionnelles [C] ou nucléaires [N]

Tableau I

Référence	Base	Tours humides		Tours sèches	
		Tirage naturel	Tirage forcé	Tirage naturel	Tirage forcé
Woodson Etats-Unis	Réfrigération directe 0,0162 frs/kWh	3,7 (N)	1,7 (N)	25,9 (N)	15,9 (N)
Gaudfroy France	Réfrigération directe	3,7 (C) 4,8 (N)	—	—	—
EdF France	Réfrigération directe	4,0 (C) 5,0 (N)	— —	9,0 (C) 11,0 (N)	— —
Pellaud Suisse	Réfrigération directe 0,029 frs/kWh	6,2 (N)	8,0 (N)	14,5 (N)	16,0 (N)
Wolf Suisse	Réfrigération directe 0,037 frs/kWh	2,3 (C) 6,4 (N)	—	5,9 (C) 11,4 (N)	—
Rossie et coll. Etats-Unis	Tour humide forcée 0,0225 frs/kWh	—	—	—	12,0 (N)
Krolewski et coll. République fédérale d'Allemagne	Réfrigération directe	4,0 (C) 7,0 (N)	—	8,5 (C) 20,0 (N)	—
Oleson et coll. Etats-Unis	Réfrigération directe 0,024 frs/kWh	—	4,3 (N)	—	21,4 (N)
Forgo Hongrie	0,023 frs/kWh		—	4 à 7 (C) 6 à 9 (N)	—
Oplatka Suisse	0,023 frs/kWh		—	3,9 à 4,5 (N)	

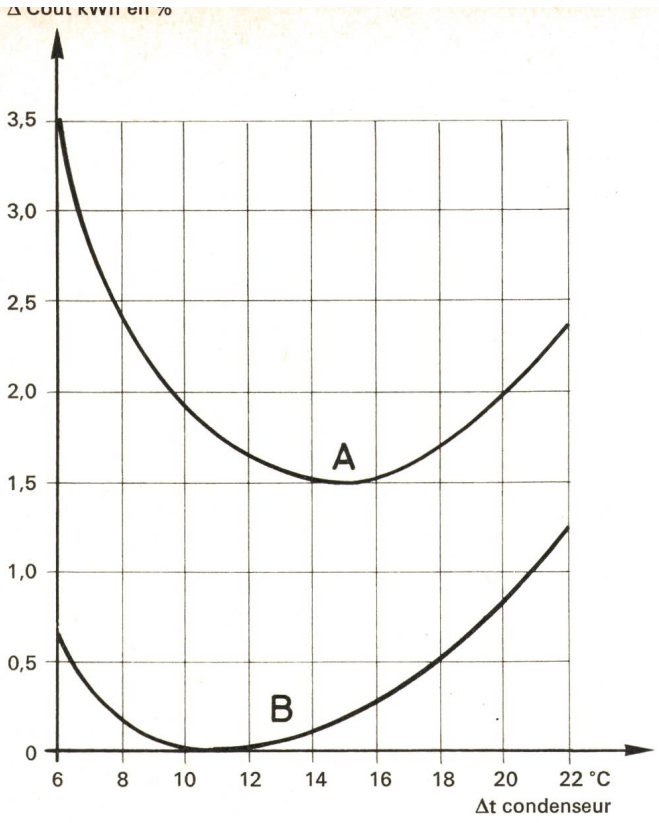

Fig. 1 Influence de l'échauffement dans le condenseur
A: Liaison 32 Mio frs pour 105 000 m³/h
B: Liaison 16 Mio frs pour 105 000 m³/h

eau qui ne se laisse concentrer sans précipitation que moyennant un traitement coûteux.

On trouve dans la littérature quelques données au sujet du coût de traitement de l'eau d'appoint. Si l'eau brute est douce et propre, les frais sont négligeables; si, par contre, elle est dure et polluée, ces frais peuvent monter à 0,10 voire 0,30 frs./m³.

2. Les autres contraintes

Quoique les contraintes thermiques sont de loin les plus importantes, on passera aussi en revue quelques autres contraintes:

2.1 Le panache de vapeur et la formation de nuages

Une objection fréquente contre les réfrigérants humides est l'existence d'un panache de vapeur d'eau. Pour autant que ce panache ne contient pas de gouttelettes d'eau et ne regagne pas la surface, il peut être assimilé à un nuage inoffensif. Tel est le cas pour des réfrigérants suffisamment hauts, munis d'éliminateurs de gouttelettes.

Devoir éliminer ce panache serait une contrainte coûteuse car le réchauffage demanderait des quantités d'énergie prohibitives et absorberait, dans certaines conditions atmosphériques, la majeure partie de l'énergie produite.

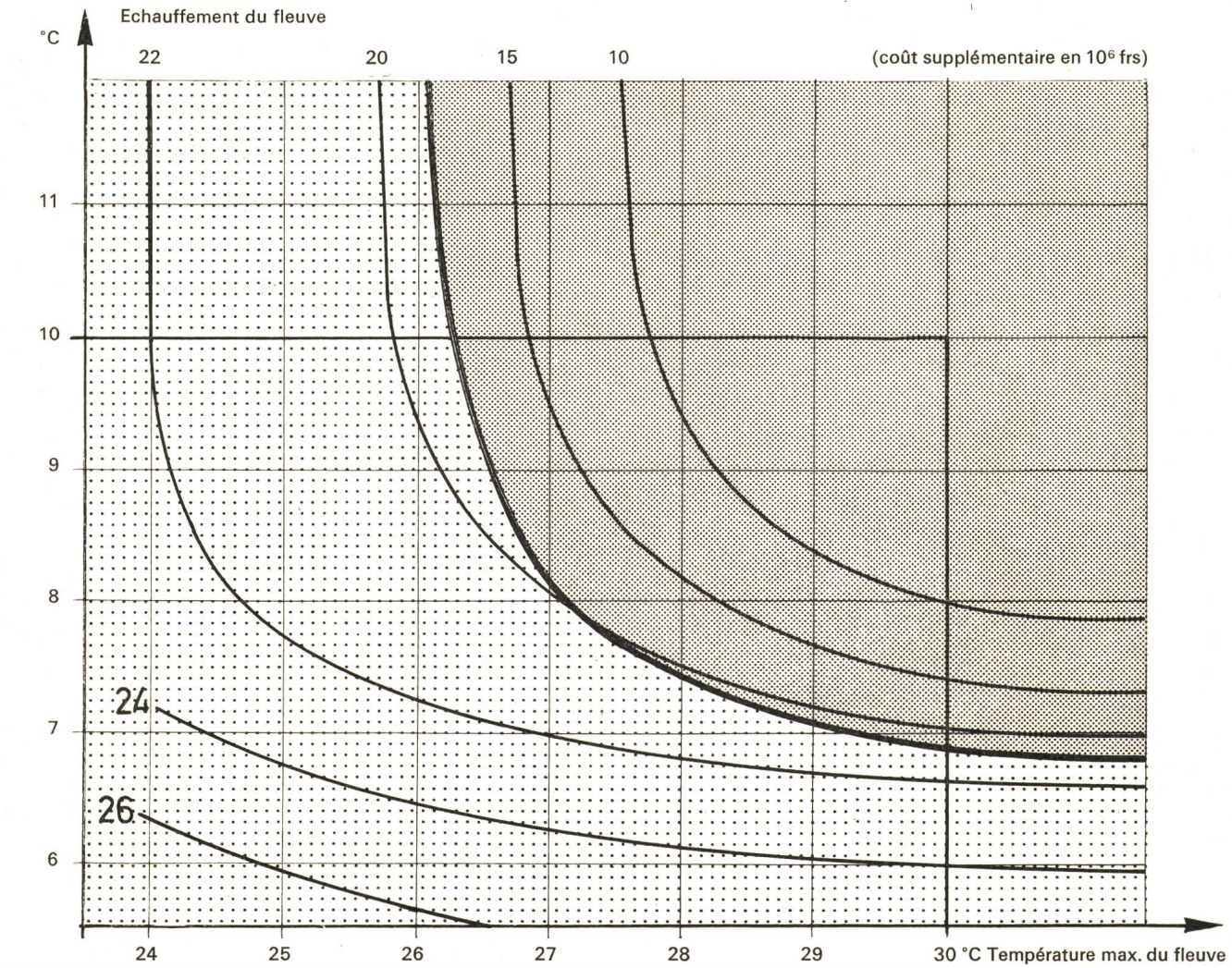

Fig. 2 Comparaison du coût de la limitation de la température du fleuve avec le coût de la limitation de l'échauffement du fleuve (EDF Site de Gien – tranche de 1200 MW nucléaire. Echauffement au condenseur de 10 °C)

Circuit mixte — Circuit ouvert — Passage ouvert-mixte

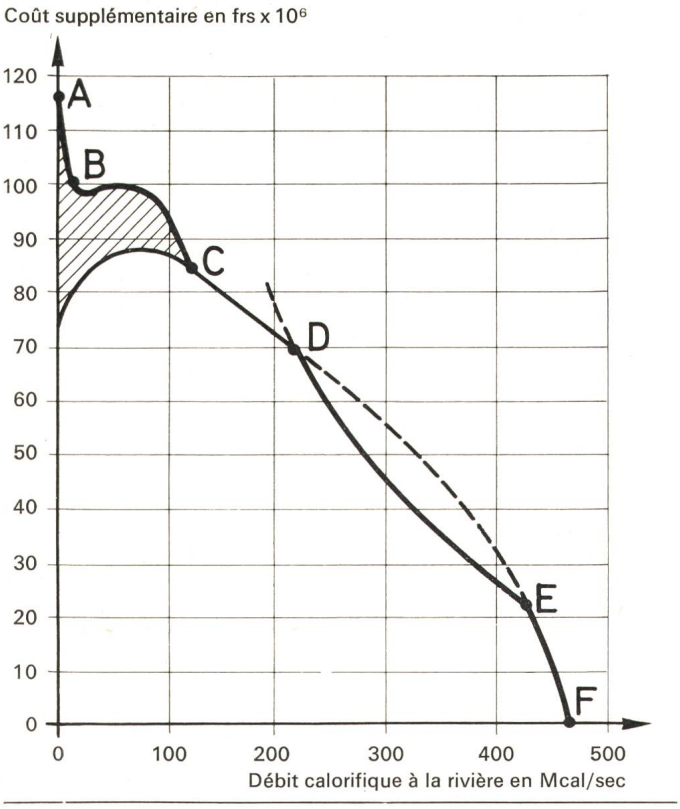

Fig. 3 Coût supplémentaire en fonction du débit calorifique à la rivière d'une unité nucléaire de 1000 MW

Frais de préparation de l'eau d'appoint

A B Circuit fermé avec décarbonatation de l'eau d'appoint
B C idem – traitement simplifié
C D E F – Circuit mixte
D E Réfrigérant sur rejet
F – Circuit ouvert

2.2 La consommation d'eau

La consommation d'eau est la mieux connue pour les circuits fermés avec réfrigérants humides et est estimée à environ 2 l/kWh pour une centrale classique et 3 l/kWh pour une centrale nucléaire à eau légère.

Elle serait trois fois moins grande lorsque la réfrigération s'opère en circuit ouvert.

Si une réglementation limite la consommation, il faut passer aux réfrigérants secs.

Le réfrigérant combiné humide-sec permettrait, en principe, de réduire, en fonction des disponibilités, la quantité d'eau d'appoint. La fig. 4 représente le coût qui en résulterait.

Il faut noter que la construction d'un réfrigérant sec, plutôt qu'un appareil humide, peut aussi résulter du coût de l'eau d'appoint. Il y aurait équilibre pour un prix de l'eau d'environ 1 fr./t, ou un déplacement de la centrale sur 400 km.

2.3 L'entraînement de gouttelettes d'eau et le givrage

Dans les tours humides, l'installation au-dessus des tuyères de dispersion d'un dispositif qui capte les gouttelettes d'eau, réduit dans une très large mesure la précipitation et le givrage. Un tel dispositif augmente le prix d'une tour de 1 à 3 %. Pour les tours à tirage naturel, la quantité d'eau entraînée est comprise entre 0,013 et 0,002 %. Dans ces conditions, la précipitation ne dépasse pas un maximum de 0,01 mm/h et ne donne pas lieu à des plaintes.

S'il y a formation de givre, celle-ci se présente sous forme d'un dépôt de faible densité qui ne sollicite pas les objets auxquels elle adhère.

On pourrait se demander si la précipitation provenant d'une tour fonctionnant à l'eau saumâtre ne donnerait pas, à la longue, lieu à des difficultés. Ceci ne semble pas être le cas pour les quelques tours en service sur eau de mer. Notons que, dans ce cas, l'éliminateur de gouttelettes est généralement plus perfectionné et que son incidence sur le prix de la tour peut monter à 8 %.

Pour les réfrigérants humides à tirage forcé, l'entraînement est nettement plus important; de l'ordre de quinze fois plus.

Lors de vents violents, l'eau qui ruisselle dans les bassins des tours peut être entraînée et se précipiter à proximité de la tour. Si la température du sol est très basse, cette précipitation peut donner lieu à la formation de givre et de verglas dans un rayon qui ne dépasse pas 100 m. Dans ces conditions, des précautions sont à prendre pour éviter des accidents sur les routes proches des tours.

2.4 Le brouillard

Dans les régions où la formation de brouillard est fréquente, les bassins d'aspersion et les réfrigérants humides de faible hauteur peuvent donner lieu à une accentuation du phénomène dans leur voisinage immédiat.

Si telle éventualité est inadmissible, par exemple à proximité d'aéroports ou passes navigables, les autorités peuvent imposer une autre solution. Pour des unités puissantes, on passera à la tour humide à tirage naturel, pour les petites unités, les réfrigérants secs à condensation directe peuvent constituer une solution.

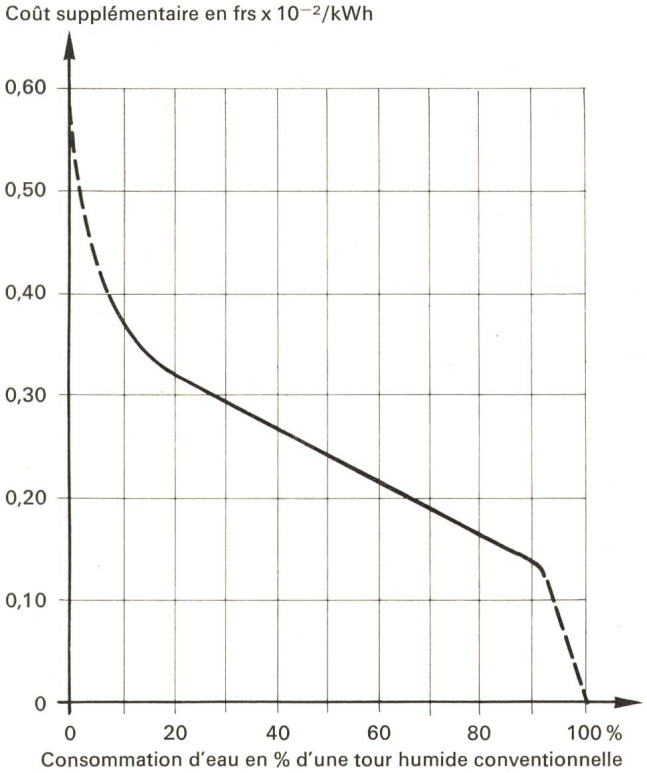

Fig. 4 Coût supplémentaire en fonction de la consommation d'eau d'une tour humide

2.5 Le bruit

Les tours de réfrigération, qu'elles soient humides ou sèches, à ventilation forcée ou à tirage naturel, font du bruit. Il provient:

a) des ventilateurs;

b) de la chute des gouttes d'eau;

c) de la résonance des ailettes dont sont munis les échangeurs des réfrigérants secs.

Le bruit ne constitue en général pas un problème considérable et, moyennant des précautions peu coûteuses, on peut l'amortir à un niveau compatible avec les exigences. Il s'agit de construction de murs ou de plantation d'arbres.

2.6 Esthétique

Les tours de réfrigération à tirage naturel des grandes centrales ont des dimensions importantes et peuvent difficilement être cachées.

Pour une centrale nucléaire de 1000 MW, on aurait:

– pour une tour humide:

hauteur	144 m
diamètre à la base	115 m
diamètre au sommet	69 m

– pour une tour sèche:

hauteur	271 m
diamètre à la base	238 m
diamètre au sommet	167 m

Les opinions sont très partagées quand il s'agit de juger l'aspect d'une tour dans un paysage. En général, une seule et grande tour est jugée préférable à un ensemble de tours moins hautes.

Si la hauteur est limitée, pour des raisons d'esthétique, on peut remplacer une tour par deux autres, de performances identiques, moyennant une augmentation des investissements de l'ordre de 9 %.

3. Conclusions

Les contraintes d'environnement ont une répercussion profonde sur les investissements et les frais d'exploitation des centrales électriques. Pour une unité nucléaire de 1000 MW, des restrictions au point de vue rejets thermiques peuvent avoir des répercussions qui se chiffrent en valeur actualisée à 100 millions de francs ou plus.

Pour éviter tout gaspillage, les capacités de nos sources froides, qui constituent une richesse naturelle, sont à utiliser au mieux et il convient d'examiner soigneusement les avantages et inconvénients que la fixation d'un critère restrictif peut présenter.

Adresses des auteurs:

J. Remeysen, directeur-adjoint, Société de traction et d'électricité, 31, rue de la Science, B-1040 Bruxelles.

J. Van Dievort, chef de service Société de traction et d'électricité, 31, rue de la Science, B-1040 Bruxelles.

G. Oplatka, conseiller scientifique, BBC/T-T, 5400 Baden.

Effets de taille des rejets de chaleur dans l'atmosphère, incidences sur le choix des sites des centrales

Extrait du rapport préparé par J. Jacquet et G. Tschirhart

Die Wahl des Standortes eines thermischen Kraftwerkes ergibt sich vor allem auf Grund von wirtschaftlichen und technologischen Überlegungen, wobei hauptsächlich der Abstand vom Konsumschwerpunkt der Energie sowie die Verfügbarkeit von Kühlwasser diese Wahl beeinflussen. Simulationsstudien betreffend den Betrieb von Kühlsystemen in Abhängigkeit der lokalen klimatischen Bedingungen können heute unter Verwendung von Modellen für die Entwicklung der Abwärmeabgabe an die Atmosphäre durchgeführt werden, wobei den Einschränkungen in einigen Gültigkeitsbereichen Rechnung getragen werden kann.

Le choix d'un site d'implantation de centrale thermique est conditionné en premier lieu par des considérations économiques et technologiques prenant en compte notamment des impératifs de proximité des centres de consommation d'énergie électrique et de disponibilités en eau de refroidissement. Il a été montré qu'une étude de simulation de fonctionnement de systèmes de réfrigération en fonction de données climatologiques locales est actuellement possible en utilisant des modèles d'évolution de rejets thermiques dans l'atmosphère tout en tenant compte des réserves exprimées sur leurs domaines de validité respectifs.

1. Introduction

Dans les centrales thermiques actuellement en exploitation, l'eau de circulation est utilisée soit en *circuit ouvert,* soit en *circuit fermé.*

A) En *circuit ouvert,* l'eau de circulation est captée froide dans une nappe d'eau naturelle (rivière, lac ou mer) et rejetée plus chaude (de 7 à 12 °C) dans la même nappe d'eau en évitant qu'elle ne soit recyclée dans le circuit de refroidissement.

L'eau chaude ainsi rejetée se refroidit selon quatre processus:

– *par évaporation* (35 à 45 % des calories rejetées);

– *par rayonnement* (25 à 35 %). Ces proportions sont variables avec le degré d'insolation;

– *par convection* avec l'eau froide du plan d'eau et *conduction* avec l'air (20 à 30 %). Ces proportions sont variables avec la nature de la nappe d'eau;

– *par conduction* des parois de la nappe d'eau (0 à 10 %). Ces proportions sont variables avec l'étendue et la profondeur de la nappe d'eau.

Ces valeurs montrent que la perte en eau, par refroidissement en circuit ouvert, exclusivement due à l'évaporation est relativement faible et varie selon les cas de *0,8 à 1,1 tonne d'eau par heure et par mégawatt.*

B) Le refroidissement de l'eau de circulation en *circuit fermé,* est basé sur l'utilisation des tours de réfrigération atmosphérique qui peuvent être de 2 types: «humides» ou «sèches».